

Aplicação do gráfico de controle por grupos em uma indústria manufatureira do estado do Ceará

João Welliandre Carneiro Alexandre (UFC) jwca@ufc.br
Luiz Fernando M. Rodrigues (ESMALTEC) qualidade@esmaltec.com.br
Fabrício Ponte Rodrigues (ESMALTEC) squalidade@esmaltec.com.br
Sílvia Maria de Freitas (UFC) silvia@ufc.br

Resumo

O modelo de gráficos de controle estatístico do processo, originalmente proposto por Walter A. Shewhart na década de 20 do século XX, é particularmente adequado para processos discretos, em que os produtos são decorrentes de somente um fluxo de produção. Contudo, esse modelo perde eficiência, ou se torna mais complexo e oneroso se aplicado aos processos com vários fluxos de produção. Em algumas situações práticas, contudo, mesmo que haja apenas um fluxo, há a necessidade de comparação entre posições, por exemplo, superior, meio e inferior, da característica monitorada, para se investigar a existência de diferenças entre elas. A aplicação do modelo proposto por Shewhart implica na construção de gráficos para cada posição, o que pode tornar o processo difícil e burocrático. Uma alternativa é a aplicação do gráfico por grupos, onde com um único gráfico é possível investigar as diferenças entre as posições. A construção desse gráfico é simples, contudo, a literatura especializada é carente em exemplos práticos de sua aplicação. Portanto, a proposta deste artigo é apresentar uma aplicação desse modelo, no processo de pintura a pó nas laterais de fogões em uma indústria manufatureira da linha branca de eletrodomésticos do estado do Ceará.

Palavras-chave: Gráficos por Grupos; Pintura a Pó; Monitoramento do Processo.

1. Introdução

As bases científicas para o controle estatístico do processo que atualmente se conhece, data do início do século XX, e foi introduzido por Shewhart (1931), que aplicou e desenvolveu os Gráficos de Controle Estatístico do Processo (GCEP), cujo princípio se baseia em que no monitoramento de um processo de fabricação em série frequentemente existe uma variável de interesse X , cuja distribuição de probabilidade está associada ao estado de controle do processo. Em particular, são comuns situações em que a variável X apresenta uma distribuição aproximadamente normal. O processo é dito estar sob controle se a média e a variância de X são, respectivamente, μ e σ^2 . Aqui μ é, em geral, um valor ajustado de acordo com as especificações de projeto, e σ^2 é uma característica do processo. O descontrole do processo ocorre quando a média desvia do valor μ e/ou quando a variância aumenta com relação ao mínimo possível σ^2 .

O esquema clássico de Shewhart baseia-se na seleção e inspeção de uma amostra de n itens a cada intervalo de h unidades de tempo. As médias amostrais, \bar{X} , são determinadas e comparadas com os limites de controle do gráfico para a média: $\mu - 3\sigma_{\bar{X}}$ e $\mu + 3\sigma_{\bar{X}}$, já previamente determinados, onde $\sigma_{\bar{X}}$ é o desvio-padrão da distribuição amostral das médias.

Se \bar{X} cair além desses limites assume-se que uma causa especial alterou a média do processo. Neste caso, ações corretivas devem ser empreendidas visando eliminar tal fonte de distúrbio.

Se \bar{X} cair dentro dos limites de controle, recomenda-se não intervir no processo. Uma das finalidades, portanto, dos gráficos de controle é a detecção rápida da ocorrência de falhas no processo.

Contudo, em processos em que o produto decorre de diferentes fluxos de produção – processos paralelos, o modelo de Shewhart pode se tornar difícil e burocrático, devido à necessidade da construção de vários gráficos de controle. Como ilustração considere o processo de fabricação de rolhas metálicas onde em cada batida de uma máquina são produzidas 27 rolhas originadas de 27 punções. Se cada punção é calibrada de forma independente e há a necessidade de investigar diferenças entre punções, são necessários 54 gráficos de Shewhart – 27 para monitorar a média e 27 para monitorar a variabilidade. Esse procedimento é inviável sob o ponto de vista prático. Um outro exemplo em que o modelo de Shewhart tem aplicação limitada é quando se deseja fazer comparações, por exemplo, entre posições, da característica de interesse da qualidade, dentro de um mesmo produto. Neste caso, gráficos de Shewhart para diferentes posições devem ser elaborados.

Uma alternativa que contorna esses problemas é a aplicação do Gráfico por Grupos (GG) RAMOS (2000). No caso das ilustrações acima é necessária a construção de apenas um gráfico para monitorar a média e outro para a variabilidade do processo. A formação adequada dos subgrupos é um fator importante na elaboração do GG, o qual certamente soluciona a grande burocracia na construção dos gráficos de controle.

A literatura é, contudo, carente em exemplos práticos, do meio produtivo, da aplicação dos GG. Um dos motivos que pode levar a essa carência é a não disponibilidade dos dados, por algumas empresas, o que é compreensível, devido ao sigilo das informações que se observa em muitos setores produtivos, motivado em muitas situações pela acirrada concorrência.

O objetivo principal, portanto, deste artigo é contribuir na redução dessa carência. Este artigo apresenta resultados de um estudo de implantação de GCEP em uma indústria manufatureira do estado do Ceará, inserido no setor de fabricação de produtos da linha branca de eletrodomésticos. O GG foi aplicado no processo de pintura a pó das laterais de fogões, cujo interesse consistia em investigar uma fonte de variação importante que é a eventual diferença entre as camadas de tintas nas posições, superior, meio e inferior dessas laterais. A aplicação do gráfico convencional de Shewhart implicaria na construção de 6 gráficos de controle – 3 gráficos para a média e 3 para a variabilidade.

No desenvolvimento deste artigo serão apresentadas, nas próximas seções, discussões sobre gráficos de controle convencionais de Shewhart e de grupos, assim como a apresentação da indústria onde o estudo foi feito e a aplicação do GG.

2. Gráficos de controle para o monitoramento do processo

Garvin (1994) apresenta a evolução da qualidade baseada em “quatro eras da qualidade”: Inspeção total, controle estatístico da qualidade (CEP), garantia da qualidade e gestão estratégica da qualidade. Nessa evolução a responsabilidade pela qualidade passou por um processo de significativa mudança, onde atualmente é do dirigente maior da empresa, diferente dos estágios iniciais, onde a responsabilidade pela qualidade era essencialmente do setor de produção.

A introdução dos GCEP faz parte da segunda era da qualidade. A grande mudança com relação à inspeção total consiste no fato de que com o CEP, o monitoramento do processo passou a ser “on-line”, isto é, durante a produção, e não somente no final, como era característica da inspeção total, o que contribui sensivelmente para a redução dos custos de produção. Na realidade as seguintes razões podem justificar o uso dos GCEP: fornecem uma

técnica para a melhoria da produtividade, são efetivos na prevenção e detecção de defeitos, previnem ajustes desnecessários no processo, fornecem informações para diagnóstico e sobre a capacidade do processo.

2.1 Algumas considerações sobre os gráficos convencionais de Shewhart

Existem duas causas que afetam diretamente um processo produtivo: 1- as *causas comuns ou aleatórias*, que são inerentes ao processo, resultantes da soma de um grande número de pequenas variações nas suas causas. Isto significa que a quantidade de variabilidade se mantém numa faixa estável. Não homogeneidade da matéria prima, flutuações de correntes, período de manutenção, procedimentos e instruções de trabalhos são alguns exemplos; 2- as *causas especiais ou assinaláveis*, que não fazem parte do processo o tempo todo. Surgem ocasionalmente devido a uma causa específica, levando aos resultados estranhos quando comparada à inerente ao processo. Estas causas devem ser imediatamente pesquisadas e bloqueadas. Um processo está "sob controle estatístico" ou simplesmente "sob controle", se está operando com apenas causas comuns de variação. Como ilustrações podem ser citadas: quebras de ferramentas ou máquinas, erro humano, procedimentos não executados e funcionário não treinado.

A ocorrência de causas especiais pode conduzir à alterações na média e/ou na variabilidade do processo. Os gráficos mais comuns e largamente apresentados na literatura são os gráficos \bar{X} e R (do Inglês *range*, que significa amplitude), este último apropriado quando $n \leq 10$. Quando $n > 10$, o gráfico para o desvio-padrão deve ser aplicado para monitorar a variabilidade. Este artigo não se propõe a apresentar em detalhes a construção destes gráficos, já que eles são bastante conhecidos. Para maiores detalhes ver (MONTGOMERY, 1991 e COSTA *et al.*, 2004). Contudo, algumas considerações podem ser apresentadas:

1. Os parâmetros dos GCEP são: o fator de largura do intervalo I , o intervalo entre as amostras h , e o tamanho de cada subgrupo (amostra) n ;
2. O gráfico \bar{X} fornece uma forte proteção contra alarmes falsos - um alarme falso a cada 370 inspeções, em média. Define-se como alarme falso, a afirmação errônea de que o processo está fora de controle. Este aspecto é particularmente importante, pois pode gerar um descrédito do gráfico e aumento dos custos devido à inspeção desnecessária;
3. Na formação dos subgrupos é necessário considerar que as variações provocadas por causas especiais, se estiverem presentes, deverão aparecer entre subgrupos e, então, tentar agrupar os dados de forma que a variabilidade resultante da atuação das causas aleatórias construa a variação dentro do subgrupo. Portanto, a eficiência dos gráficos de controle está diretamente associada a que variabilidade se deseja monitorar.

Com base nessas considerações diversos autores propuseram modelos adaptativos e alternativos ao proposto por Shewhart, e desenvolveram, também, estudos comparativos entre eles (PAGE, 1954; ROBERTS, 1959; EWAN, 1963; HUNTER, 1986; REYNOLDS *et al.* (1990); COSTA, 1994; COSTA, 1997; TONG & CHEN, 1998; COSTA, 1999a; COSTA, 1999b; WISNOWSKI & KEATS, 1999; CHAN *et al.* 2000, COSTA, 2001; ALEXANDRE & FARIAS, 2004).

2.2 Gráficos de controle por grupos

Conforme pode ser visto em Ramos (2000), na formação dos subgrupos racionais recomenda-se que não se devem misturar produtos de diferentes fluxos de produção (processo em paralelo), pois a ocorrência de diferenças entre eles, reveladas pelo gráfico de controle, pode ser consequência do problema de estratificação dos subgrupos.

Um outro fator importante na formação dos subgrupos está relacionado à variação transversal e longitudinal no processo. No gráfico convencional de Shewhart para a média e amplitude, por exemplo, o valor da amplitude média calculada a partir da amplitude de cada subgrupo, determina a largura dos limites para o gráfico da média. Isto significa que a variabilidade dentro de cada amostra determina o quanto de diferença pode existir na variação entre as amostras. Como em geral, nesse caso, os produtos são discretos e oriundos de um mesmo fluxo, as amostras são selecionadas de forma consecutiva no tempo. Em processos em paralelo, como por exemplo, no caso da fabricação das rolhas metálicas mencionadas acima, a variabilidade dentro de cada batida (variabilidade transversal – variabilidade entre as 27 punções) tem características diferentes da variabilidade entre as batidas (variabilidade longitudinal – detecta a variabilidade entre cada punção). Semelhante análise pode ser feita para o caso de investigar diferenças entre as posições: variabilidade transversal, dentro de cada lateral, e variabilidade longitudinal, entre laterais (detecta diferença entre posições).

O GG, que pode ser aplicado nessas situações, pode ser considerado como uma variação do gráfico convencional de Shewhart. A elaboração é bastante simples e o princípio fundamental está na formação dos subgrupos. (A Tabela 1 abaixo apresenta uma configuração geral de uma planilha de dados, para a aplicação a ser apresentada neste artigo).

Grupo	Amostra	Posição	Produto 1	...	Produto k	Média	Amplitude
1	1	Superior	$X_{1,1}$	...	$X_{1,n}$	\bar{X}_1	R_1
	2	Meio	$X_{2,1}$	...	$X_{2,n}$	\bar{X}_2	R_2
	3	Inferior	$X_{3,1}$	...	$X_{3,n}$	\bar{X}_3	R_3
.	.	Superior	.	...	.	.	.
.	.	Meio	.	...	.	.	.
.	.	Inferior	.	...	.	.	.
m	k-2	Superior	$X_{k,1}$	...	$X_{k-2,n}$	\bar{X}_{k-2}	R_{k-2}
	k-1	Meio	$X_{k,1}$	...	$X_{k-1,n}$	\bar{X}_{k-1}	R_{k-1}
	k	Inferior	$X_{k,1}$	...	$X_{k,n}$	\bar{X}_k	R_k

Tabela 1 – Modelo geral de planilha de dados para o GG

O procedimento para a formação dos subgrupos consiste em:

1. Selecionar n (n = 2, em geral, contudo pode ser 3, 4 ou 5) produtos de forma consecutiva, a cada intervalo de tempo h, e para cada produto medir a característica de interesse de cada posição. Cada posição é considerada aqui uma amostra e as medidas das 3 posições dos produtos selecionados formam um grupo. Neste caso o número total de amostras k = 3*m, onde 3 é o número de amostras em cada grupo e m o número de grupos;
2. Formar m grupos (10 ≤ m ≤ 15) em geral, cada grupo conforme descrito no item anterior;
3. Determinar as médias e amplitudes de cada amostra (posição);
4. Determinar os limites de controles dos gráficos para a média e amplitude da forma tradicional, ou seja, semelhante ao modelo de Shewhart, que são, respectivamente,

$$LSC = \bar{\bar{X}} + A_2 * \bar{R} \quad \text{e} \quad LSC = D_4 * \bar{R} \\ LIC = \bar{\bar{X}} - A_2 * \bar{R} \quad \text{e} \quad LIC = D_3 * \bar{R}, \quad \text{onde } \bar{\bar{X}} \text{ e } \bar{R} \text{ são, respectivamente, a média e}$$

amplitude média do processo (linhas centrais), A_2 , D_3 e D_4 são funções de n e tabelados;

5. Plotar a maior e a menor média de cada grupo, no gráfico para a média, e a maior amplitude, no gráfico para a amplitude. Se ambos os gráficos apresentarem um comportamento aleatório com todos os pontos dentro dos limites de controle, tem-se uma

indicação de que o processo está sob controle estatístico; caso contrário recomenda-se investigar e corrigir as causas que levaram a esse estado de instabilidade no processo.

Observa-se que, além de ser possível monitorar diferenças entre posições com base em somente um gráfico para a média, diferente do modelo de Shewhart onde seriam necessários 3 gráficos, no gráfico da amplitude é utilizada a variabilidade longitudinal das medidas.

3. Aplicação dos gráficos de controle por grupos

A Figura 1 apresenta o fluxo do processo da pintura a pó, que foi objeto de estudo neste artigo. É importante afirmar que antes deste estudo, a empresa não tinha gráficos de controle para monitorar o processo.

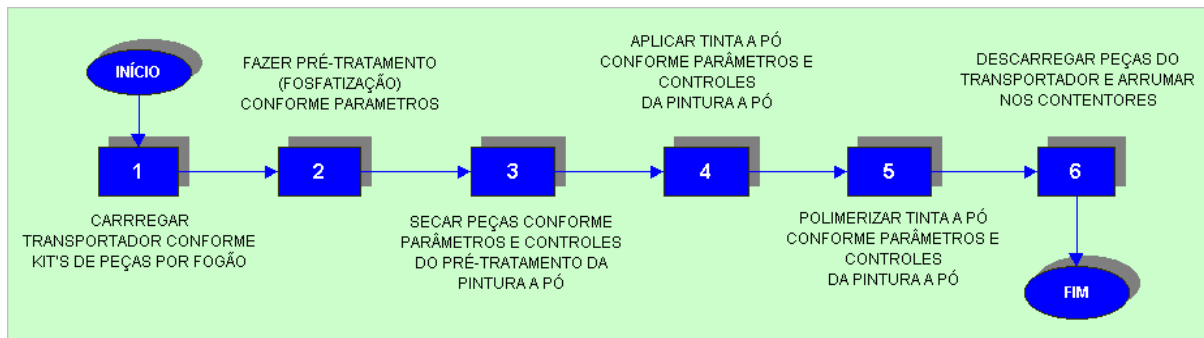


Figura 1 – Fluxo do processo de pintura a pó

A produção de fogão possui uma etapa de pintura a pó eletrostático composta por 3 linhas. Cada linha é composta de pistolas móveis, na vertical, distribuídas em pontos estratégicos que lançam o pó sobre a peça e um transportador suspenso que direciona, na horizontal, as peças a serem pintadas. O pó é lançado por pressão da linha de ar e se direciona a peça por meio de um campo magnético que é criado entre a peça e a pistola. Assim o pó fica com certa tensão na peça até que seja aquecido e tome as características de uma pintura normal. Como o processo acontece de forma bem dinâmica, é passivo a falhas durante a distribuição do pó, como camadas mais baixas e/ou elevadas em certos pontos, devido a entupimentos, paradas de transportador e etc. O gráfico por grupo foi aplicado na linha 3, considerada a mais estável pela empresa.

O indicador que caracteriza a distribuição de pó na peça é a espessura da camada de tinta. O monitoramento ocorre por meio de um aparelho de medição chamado eucômetro e a unidade de medida é apresentada em micrômetros (μm). Os limites de espessura especificados em projeto são de 30 a 50 micrômetros. Camadas baixas são passivas à oxidação precoce da peça e as altas estão sujeitas à quebra da tinta.

Foram coletados consecutivamente a cada duas horas, 2 laterais de fogão. Procurou-se manter o procedimento de medição que a empresa já aplica em cada lateral, que são seis: duas medições para cada posição superior, meio e inferior. (Ver Figura 2). Para efeito da construção dos GG foram utilizadas as médias dentro de cada posição como medidas das posições de cada lateral. A Tabela 2 apresenta a planilha dos dados.



Grupo	Amostra	Posição	Lateral 1		\bar{X}_1	Lateral 2		\bar{X}_2	\bar{X}	Amplitude
			Medida 1	Medida 2		Medida 1	Medida 2			
1	1	Superior	32	30	31,0	30	35	32,5	31,75	1,5
	2	Meio	34	30	32,0	33	32	32,5	32,25	0,5
	3	Inferior	32	30	31,0	30	32	31,0	31,00	0,0
2	4	Superior	33	33	33,0	36	35	35,5	34,25	2,5
	5	Meio	37	41	39,0	33	35	34,0	36,50	5,0
	6	Inferior	35	40	37,5	35	31	33,0	35,25	4,5
3	7	Superior	37	31	34,0	36	34	35,0	34,50	1,0
	8	Meio	30	32	31,0	30	30	30,0	30,50	1,0
	9	Inferior	34	33	33,5	31	35	33,0	33,25	0,5
4	10	Superior	30	30	30,0	32	34	33,0	31,50	3,0
	11	Meio	32	30	31,0	32	30	31,0	31,00	0,0
	12	Inferior	31	30	30,5	30	31	30,5	30,50	0,0
5	13	Superior	38	34	36,0	39	36	37,5	36,75	1,5
	14	Meio	30	35	32,5	34	34	34,0	33,25	1,5
	15	Inferior	32	35	33,5	35	37	36,0	34,75	2,5
6	16	Superior	43	35	39,0	39	40	39,5	39,25	0,5
	17	Meio	36	33	34,5	37	36	36,5	35,50	2,0
	18	Inferior	33	39	36,0	33	35	34,0	35,00	2,0
7	19	Superior	31	30	30,5	37	32	34,5	32,50	4,0
	20	Meio	32	31	31,5	32	30	31,0	31,25	0,5
	21	Inferior	36	33	34,5	32	30	31,0	32,75	3,5
8	22	Superior	34	38	36,0	36	38	37,0	36,50	1,0
	23	Meio	32	40	36,0	37	38	37,5	36,75	1,5
	24	Inferior	40	37	38,5	37	40	38,5	38,50	0,0
9	25	Superior	31	35	33,0	38	37	37,5	35,25	4,5
	26	Meio	31	34	32,5	34	38	36,0	34,25	3,5
	27	Inferior	34	38	36,0	31	31	31,0	33,50	5,0
10	28	Superior	39	39	39,0	39	34	36,5	37,75	2,5
	29	Meio	39	34	36,5	33	34	33,5	35,00	3,0
	30	Inferior	36	34	35,0	34	31	32,5	33,75	2,5
11	31	Superior	38	34	36,0	30	30	30,0	33,00	6,0
	32	Meio	33	31	32,0	31	30	30,5	31,25	1,5
	33	Inferior	34	35	34,5	38	37	37,5	36,00	3,0

Figura 2 – Modelo da lateral do fogão e os pontos de medição

Tabela 2 – Planilha dos dados para a construção do GG

4. Resultados e análises dos dados

A partir dos dados da Tabela 2, foram calculados os limites de controle para os gráficos da média e amplitude, que são apresetados na Tabela 3, abaixo:

Limites	Média	Amplitude
Inferior	30,022	0,000
Linha central	34,182	2,212
Superior	38,342	7,231

Tabela 3 – Valores da linha central e limite superior e inferior

A Figura 3 apresenta o gráfico para as médias onde são plotadas a maior e menor média de cada grupo, no caso da carta de controle para \bar{X} , correspondente à penúltima coluna da Tabela 2. Na Figura 4 estão plotados os valores da maior amplitude de cada grupo, e revela um processo sob controle com relação à variabilidade.

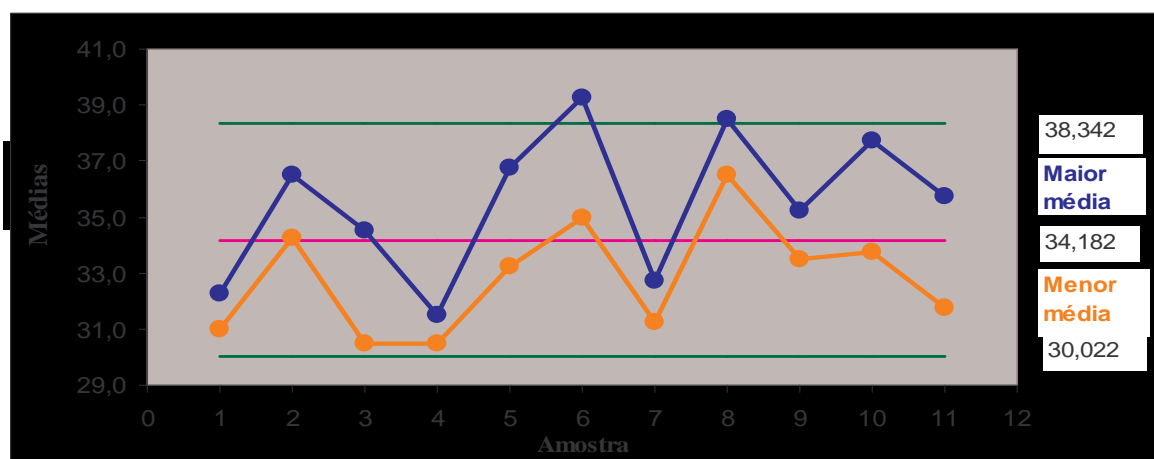


Figura 3 – Gráfico da média

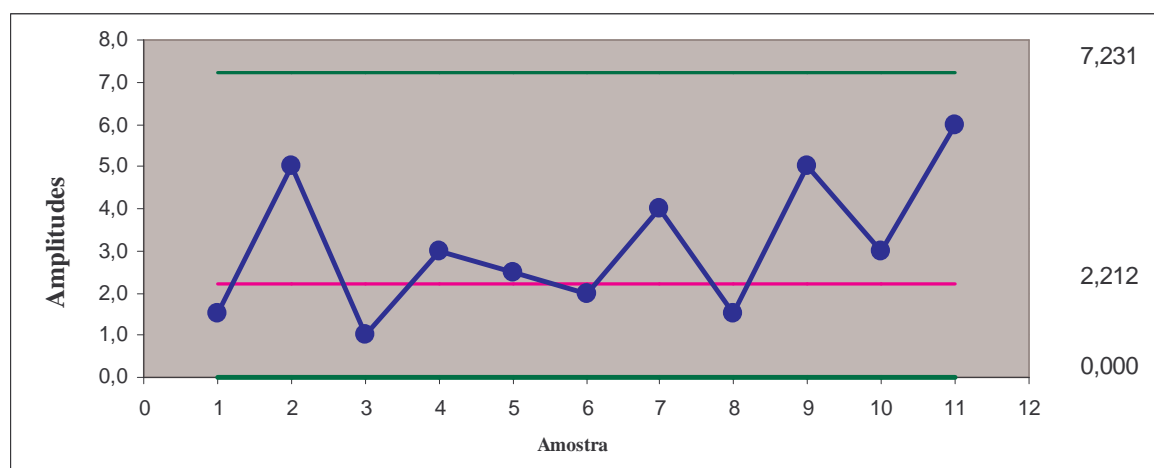


Figura 4 – Gráfico da amplitude

A Figura 3 mostra 2 pontos acima do limite superior de controle: maiores médias dos grupos 6 e 8. Ao consultar a Tabela 2 observa-se que esses pontos são referentes à posição superior e inferior, respectivamente, apresentando diferenças significativas das camadas de tinta dessas posições com as outras duas, nos correspondentes grupos. Isso revela, a princípio, instabilidade no processo.

Após uma investigação no processo não foi detectada qualquer causa especial que levasse a ocorrência desses dois pontos. Uma investigação no sistema de medição mostrou uma alta

sensibilidade no instrumento de medida, que é afetado por fatores tais como: ventilação no ambiente de trabalho, manuseio do operador e procedimento de medição. Concluiu-se, portanto, que o processo está sob controle estatístico e que a ocorrência desses pontos está diretamente associado ao sistema de medição. Novos procedimentos de medição para eliminar esses fatores foram definidos.

É importante afirmar que existem 3 linhas de produção na empresa aqui pesquisada. Assim, somente para monitorar a média são necessários 9 gráficos tradicionais de Shewhart.

5. Conclusão

O GG se mostrou uma ferramenta eficiente dentro do objetivo da empresa, tratado neste artigo, de monitorar diferenças da quantidade de camadas de tinta entre as posições da lateral do fogão. Uma redução nos tempos e custos de amostragem, e a menor quantidade de gráficos de controle são benefícios imediatos do GG com relação ao tradicional de Shewhart.

A ilustração aqui apresentada buscou mostrar uma situação onde, para alguns processos industriais, a implantação de GGEP com base nos gráficos convencionais de controle pode não ser a alternativa mais viável sob o ponto de vista prático. Espera-se também com esse artigo contribuir para uma menor distância entre a teoria e a realidade.

Referências

ALEXANDRE, J. W. C. & FARIAS, R. B. A. *Um estudo comparativo sobre a eficiência entre os modelos Shewhart e da média móvel ponderada exponencialmente com amostragens em dois estágios*. Encontro Regional de Métodos Estatísticos para a Melhoria da Qualidade, realizado em 8 a 12 de novembro, Natal-RN, 2004.

CHAN, L. Y.; XIE, M. & GOH, T. N. *Cumulative Quantity Control Charts for Monitoring Production Process*. International Journal of Production Research. Vol. 38, n. 2, p. 397-408, 2000.

COSTA, A. F. B. \bar{X} Charts with Variable Sample Size. Journal of Quality Technology. Vol. 26, n. 3, July, 155-63, 1994.

COSTA, A. F. B. \bar{X} Charts with Variable Sample Size and Sampling Intervals. Journal of Quality Technology. Vol. 29, n. 2, April, p. 197-204, 1997.

COSTA, A. F. B. Joint \bar{X} and R Charts with Variable Sample Sizes and Sampling Intervals. Journal of Quality Technology. Vol. 31, n. 4, October, p. 387-97, 1999a.

COSTA, A. F. B. \bar{X} Charts with Variable Parameters. Journal of Quality Technology. Ol. 31, n. 4, October, p. 408—16, 1999b.

COSTA, A. F. B. *Gráficos \bar{X} e R com amostragens em dois estágios*. Salvador-BA. Anais do XXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP, CD-ROM, 2001.

COSTA, A. F. B. ; EPPRECHT, E. K. ; CARPINETTI, L. C. R. C. *Controle Estatístico de Qualidade*. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2004.

EWAN, W. D. *When and How to Use Cu-Sum Charts*. Technometrics. Vol. 5, n. 1, February, p. 1-22, 1963.

GARVIN, D. A. *Gerenciando a qualidade: a visão estratégica e competitiva*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1992.

HUNTER, J. S. *The Exponentially Weighted Moving Average*. Journal of Quality Technology. Vol. 18, n. 4, p. 203-9, 1986.

MONTGOMERY, D. C. *Introduction to Statistical Quality Control*. New York: John Wiley & Sons, 1991.

PAGE, E.S. *Continuous Inspection Schemes*. Biometrika, Vol. 41, p. 100-114, 1954.

RAMOS, A. W. CEP para processos contínuos e em bateladas. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 2000.

REYNOLDS Jr, M. R. ; AMIN, R. W. & ARNOLD, J . C. *CUSUM charts with variable sampling intervals*. Technometrics_Vol. 32, n. 4, p. 371-84, 1990.

ROBERTS, S. W. *Control Charts Tests based on Geometric Moving Averages*. Technometric. Vol. 1, 239-50, 1959.

SHEWHART, W. A. *Economic Control Quality of Manufacturing Product*. New York: Van Nostrand, 1931.

TONG, L. I. & CHEN, J. P. *Lower Confidence Limits of Process Capability Indices for Non-normal Process Distributions*. International Journal of Quality & Reliability Management. Vol. 15, n. 8/9, p. 907-19, 1998.

WISNOWSKI, J. W. & KEATS, J. B. *Monitoring the Availability of Assets with Binomial and Correlated Observations*. Quality Engineering. Vol. 11, n. 3, p. 387-93, 1999.